SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO

Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica

Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

3

ESTIMACION REGIONAL DE RECURSOS HIDRICOS EN CUENCAS NIVOPLUVIALES

BONIFACIO FERNANDEZ L.(1), GONZALO PIZARRO P.(2)

RESUMEN

Las propiedades estadísticas de los caudales medios mensuales son habitualmente empleadas para estudiar y analizar sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos. Si no se tienen registros en el lugar de interés para calcular directamente estas propiedades es necesario estimarlos empleando para ello alguno de los métodos alternativos propuestos en la literatura hidrológica. En este artículo se emplean relaciones obtenidas de modelos de Funciones de Transferencia (FT) entre la precipitación total y los caudales a nivel mensual para estimar las propiedades estadísticas de las series de gastos medios mensuales, encontrando para ello relaciones empíricas regionales entre las propiedades de las cuencas y los parámetros de modelos del tipo FT de bajo orden, desarrolladas para cuencas nivopluviales de la zona Central de Chile.

1) Ing. Civil, Ph.D. Profesor Titular de Ingeniería Hidráulica. Depto. de Ing. Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860. Santiago, Chile.
2) Ing. Civil, Ms. Profesor Instructor de Ingeniería Hidráulica. Depto. de Ing. Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile. Av. Vicuña Mackenna 4860. Santiago, Chile.

INTRODUCCION

La estimación del comportamiento de los recursos hídricos superficiales en una cuenca con escasa información es un problema común en regiones de poco desarrollo relativo. El comportamiento estadístico de las series de valores medios mensuales puede resumirse en los promedios, varianzas, asimetrías y momentos de orden superior, así como en la estructura de dependencia de los valores mensuales. Si bien en general la información de caudales es escasa, o al menos no siempre está disponible en las secciones en que se desea realizar el aprovechamiento, no ocurre lo mismo con la de precipitación, ya que habitualmente su comportamiento espacial puede estimarse basado en registros en estaciones cercanas. En esta linea es común utilizar métodos apoyados en técnicas de regresión entre las precipitaciones y la escorrentía para transferir información con métodos claramente establecidos (Fiering, 1963; Matalas y Jacobs, 1964; Fernández y Salas, 1995). Desafortunadamente los modelos de regresión lineal suponen valores independientes y consecuencias simultáneas, de manera que no son capaces de incorporar la dependencia temporal existente en las series cronológicas de las variables hidrometeorológicas. Las series cronológicas de caudales y precipitaciones mensuales se pueden relacionar mediante regresiones dinámicas, y en base a los parámetros de estos modelos y las propiedades de la serie de exitación es posible determinar las características de la serie respuesta (Fernández y Pizarro, 1995). En este artículo se intenta aprovechar estas relaciones para estimar el comportamiento de los caudales en cuencas nivopluviales sin infomación con una estimación regional de los parámetros de los modelos de función de transferencia.

Para ello los parámetros de los modelos y sus propiedades derivadas se relacionan con algunas características físicas de la cuenca, como son la latitud, área total, orientación, altura media, coeficiente de escorrentía y otras similares, para ser empleados en cuencas sin registros de caudales. Las relaciones se establecen para cuencas de la zona central de Chile que presentan un comportamiento nivopluvial.

ESTIMACION REGIONAL DE LOS PARAMETROS DEL MODELO.

Para emplear las relaciones propuetas por Fernández y Pizarro, 1995, es necesario conocer los valores de los parámetros del modelo de transferencia así como el promedio y la varianza de las precipitaciones totales mensuales. En el caso de las cuencas de la zona central de Chile se ha observado que un modelo de bajo orden reproduce adecuadamente el comportamiento de ellas con un gran ahorro de parámetros. El modelo propuesto se expresa como

$$Q_t = \frac{c}{1 - aB} L_t + \frac{e + fB}{1 - dB} B^b S_t + \varepsilon_t \qquad (1)$$

donde (a,b,c,d,e,f) son los parámetros del modelo, B es el operador de retardo, L_t es la precipitación líquida mensual y S_t la sólida. Q_t es el gasto medio mensual. Una vez conocidos (a,b,c,d,e,f) se puede emplear el algoritmo de las ecuaciones (14) y (18) de Fernández y Pizarro (1995) para encontrar los promedios y varianzas de los caudales mensuales en función de comportamiento de las precipitaciones totales.

Para la estimación regional de parámetros de los modelos se puede elegir la estimación de (a,c,d,e,f) o en forma alternativa recurrir a estimar alguna propiedad del modelo relacionada con los parámetros. Entre estas son de interés la ganancia de la precipitación líquida, g_L, y de la sólida, g_S, que corresponden a la respuesta del sistema frente a una excitación del tipo escalón. Estas funciones están dadas por las siguientes relaciones para un modelo como el (1):

$$g_L = \frac{c}{1 - a} \qquad (2)$$

$$g_S = \frac{e + f}{1 - d} \qquad (3)$$

La ventaja de estas funciones sobre los parámetros es que existiría una idea del comportamiento de ellas relacionada con factores físicos de la cuenca, sobre la cual el hidrólogo podría tener un conocimiento anticipado que le ayudaría en la selección de los parámetros, ya que están bastante ligados al concepto del coeficiente de escorentía marginal.

Para la estimación regional de los parámetros de los modelos se han establecido correlaciones simples y múltiples entre los parámetros propiamente tales y las ganancias, con características cuantificables de las cuencas indicadas en la Tabla 1. En base a un análisis preliminar se encontró que los mejores parámetros explicativos corresponden a la latitud, altura media, precipitación total promedio y la desviación típica de la precipitación total. Además se aprecia que las estimaciones de las ganancias son mejores que las de los parámetros.

Tabla 1.- Cuencas seleccionadas para la estimación regional de parámetros.

Río	Estación	Lat. °Sur	Área (Km^2)	Hmáx. (msnm)	Hmed. (msnm)	Hmín. (msnm)	Prec. (mm)	C.Esc.
Putaendo	Los Patos	32,52	927	4400	2731	1218	286	0,486
Aconcagua	Chacabuquito	32,83	2400	5100	3288	1030	434	0,553
Mapocho	Los Almendros	33,37	620	4928	2530	1024	329	0,493
Maipo	El Manzano	33,58	4968	6550	2386	850	598	0,595
Cachapoal	Puente Termas	34,25	2367	5160	2777	710	1086	0,735
Tinguiririca	Bajo Briones	34,68	1400	4300	2560	518	1138	0,782
Teno	Los Queñes	35,00	833	3920	2338	900	1514	0,664
Claro	Los Queñes	35,00	350	4101	2119	900	1642	0,658
Colorado	Junta con Palos	35,27	942	3553	2087	600	1440	0,605
Maule	Armerillo	35,70	5323	3942	1964	450	1386	0,666
Ñuble	San Fabián	36,57	1709	2680	1757	410	2230	0,842
Laja	Diguillín	37,72	2680	2979	1502	285	1674	0,728
Bío Bío	Rucalhue	38,43	7044	2965	1781	245	2173	0,901

Los parámetros de los modelos correspondientes a cada cuenca se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros del modelo y propiedades básicas para las cuencas seleccionadas.

Río	Parámetros						Ganancias		Var (ε)
	a	c	d	e	f	b	g_L	g_S	
Putaendo	0,887	0,049	0,100	0,283	0,112	5	0,434	0,439	323
Aconcagua	0,925	0,044	0,201	0,225	0,214	5	0,587	0,549	490
Mapocho	0,835	0,072	0,251	0,163	0,155	5	0,436	0,425	237
Maipo	0,924	0,049	0,074	0,268	0,253	5	0,645	0,563	703
Cachapoal	0,945	0,038	0,100	0,222	0,412	5	0,691	0,704	2205
Tinguiririca	0,901	0,080	0,355	0,289	0,199	5	0,808	0,757	1775
Teno	0,896	0,082	0,200	0,536	0,000	5	0,788	0,670	6027
Claro	0,745	0,208	0,441	0,206	0,141	4	0,816	0,621	4041
Colorado	0,901	0,079	0,200	0,280	0,249	4	0,798	0,661	4950
Maule	0,837	0,111	0,250	0,320	0,236	4	0,681	0,741	1990
Ñuble	0,732	0,231	0,220	0,592	0,078	4	0,862	0,859	6621
Laja	0,637	0,312	0,400	0,212	0,000	4	0,860	0,353	3483
Bío Bío	0,656	0,280	0,250	0,447	0,174	4	0,814	0,828	4473

En la Figura 1 se muestran las relaciones gráficas de algunos parámetros en función de las variables explicativas. En las cuencas nivopluviales andinas de la zona central de Chile se ha observado que el retardo de la precipitación sólida, b, está entre 4 y 5 meses dependiendo de la latitud de la cuenca. Las relaciones encontradas son todas correlaciones múltiples, lineales o con variables transformadas. Con ellas se propone el siguiente algoritmo de estimación de parámetros de los modelos de cuencas de la región:

$$g_L = 0.0158\frac{P_A}{1000} + 1.0264C_{esc} - 0.0235 \quad (4)$$

$$g_S = 0.0970\frac{H_{med}}{1000} + 0.0935Lat - 2.83 \quad (5)$$

$$c = 10^{\left(0.0855Lat - 0.2953\frac{H_{med}}{1000} - 3.3262\right)} \quad (6)$$

$$f = 0.3392g_S - 0.0318Lat + 1.071 \quad (7)$$

$$d = \left(0.0453\frac{H_{med}}{1000} - 0.4393a^4 + 0.595\right)^2 \quad (8)$$

Entonces: $a = 1 - \frac{c}{g_L}$ y $e = (1 - d)g_S - f$ (9)

Donde P_A es la precipitación media anual sobre la cuenca en mm; C_{esc} es el coeficiente de escorrentía estimado para la cuenca, obtenible de un balance hídrico regional; H_{med} es la altura media de la cuenca en metros; Lat es la latitud de la salida de la cuenca, en grados.

La estimación del desfase b se puede hacer en forma simple aceptando que las cuencas nivopluviales de la región presentan valores de desfase de la precipitación sólida entre 4 y 5 meses. Se recomienda adoptar un valor de b similar al de cuencas vecinas a menos que se cuente con antecedentes mejores.

DISTRIBUCION MENSUAL DE LA PRECIPITACION LIQUIDA

El coeficiente de precipitación líquida de cada mes para cada cuenca en particular indica la proporción de la precipitación total sobre la cuenca que está disponible para escurrir en el mismo mes en que cae. El resto de la precipitación total cae en forma sólida y es almacenada

durante b meses. En las cuencas nivopluviales, en las cuales se puede producir esta combinación de precipitaciones es necesario estimar los valores de l_t, para t=1,2,...,12. Para un mes cualquiera el valor de l_t puede entenderse como la proporción de la cuenca total sobre la cual la precipitación es líquida, incluyendo como tal la sólida que escurre en ese mismo mes. Esto depende de la ubicación de la linea de nieve, o de la altura a la que se encuentra la temperatura de la atmósfera que separa ambos tipos de precipitación y de la distribución de la precipitación con la altura. También influyen las variaciones de temperatura que se producen en cada mes, que contribuyen al derretimiento inmediato de la precipitación sólida caída. Para estimarlo se propone un procedimento sencillo basado en el cálculo de la altura de la temperatura crítica, T_c, que separa en cada cuenca ambos tipos de precipitación, aceptando un gradiente regional de temperatura con la altura, G_R. Entonces, sea $Z_t(T_c)$ la altura que divide la precipitación líquida de la sólida en el mes t. Ella se estima cada mes en base a las temperaturas medias mensuales de una estación base, T_{bt}, que se encuentra a una altura Z_b como:

$$Z_\tau(T_c) = Z_b + \frac{(T_{b\tau} - T_c)}{G_R} \qquad (10)$$

Entonces:

$$\lambda_\tau = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad Z(T_c) > Z_{max} \\ 1 - \dfrac{A(Z_\tau(T_c))}{A(Z_{min})} & \text{si} \quad Z_{min} < Z(T_c) \le Z_{max} \\ 0 & \text{si} \quad Z(T_c) < Z_{min} \end{cases} \qquad (11)$$

donde Z_{max} y Z_{min} son las alturas máximas y mínimas de la cuenca, y A(Z) corresponde al área de la cuenca que se encuentra sobre la altura Z. El valor de Tc resulta ser bastante menor que la temperatura de congelamiento, para considerar el derretimiento inmediato. Se ha encontrado que puede explicarse en función de la latitud de la cuenca, según la siguiente relación encontrada para la región:

$$T_c = 1{,}024Lat - 40{,}795 \qquad (12)$$

EJEMPLOS DE ESTIMACION EN CUENCAS SIN REGISTRO

A continuación se muestran algunos ejemplos de la metodología expuesta para estimar los valores promedios y las varianzas de los caudales mensuales de algunas cuencas en la zona central de Chile. Las cuencas consideradas son del tipo nivopluvial, ubicadas en el interior de la región considerada y cuentan con registros de manera que es posible comparar los resultados del procedimiento propuesto con los valores registrados. Sus propiedaes básicas obtenidas de planos e información general de la región se indican en la Tabla 3.

Tabla 3.- Propiedades básicas de las cuencas para estimar el promedio y la varianza de los caudales mensuales.

Río	Estación	Cuenca	Latitud (°S)	Area (Km^2)	Altura media (msnm)	Precip. anual (mm)	Coef. escorr.
Volcán	Queltehues	Maipo	33,8	523	3355	1333	0,677
Claro-1	Las Nieves	Rapel	34,5	276	1920	1464	0,642
Claro-2	Camarico	Maule	35,2	684	924	1424	0,631
Melado	La Lancha	Maule	35,9	2148	1914	2005	0,736

El promedio y la varianza de la precipitación mensual sobre cada una de ellas se puede estimar en base a los registros de estaciones pluviométricas en el área. Similarmente en base a registros de temperaturas cercanos se han estimado los coeficientes de separación de la precipitación líquida para cada mes.

En base a las regresiones regionales planteadas en (4) a (9) se estiman los parámetros del modelo de transferencia, con lo que se obtienen los valores que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.- Propiedades del modelo de transferencia para cada cuenca.

Río	g_L	g_S	a	c	d	e	f	b
Volcán	0,740	0,656	0,946	0,037	0,156	0,335	0,219	5
Claro-1	0,615	0,582	0,827	0,114	0,227	0,278	0,171	5
Claro-2	0,779	0,548	0,672	0,256	0,300	0,245	0,136	4
Melado	0,764	0,708	0,805	0,149	0,249	0,361	0,171	4

Para el valor del desfase se ha empleado el de cuencas cercanas disponibles en la estimación

regional de la Tabla 2. Con estos parámetros es posible aplicar las ecuaciones (14) para estimación de los promedios y (17) de Fernández y Pizarro,1995, para las varianzas mensuale Los resultados de esta transformación se muestran de manera gráfica en la Figura 2 para vari de estos ejemplos, incluyendo los promedios y desviaciones típicas de la series de precipit ciones medias mensuales, los promedios y desviaciones típicas de la serie de caudales estim dos con el procedimiento descrito y los obtenidos en cada cuenca en base al registro de estación fluviométrica correspondiente. Se observa que la transformación suaviza estacionalidad de las características de las precipitaciones, siguiendo de manera bastante ad cuada el ciclo de las propiedades de la escorrentía. Las estimaciones de los promedios resulta mejores que las de las varianzas.

CONCLUSIONES

En este artículo se han establecido relaciones regionales que estiman los parámetros d modelos simples del tipo Regresión Dinámica considerando propiedades de la cuenca qu pueden calcularse fácilmente en base a información generalmente disponible. El procedimient descrito permite obtener estimaciones de 24 parámetros estadísticos de las series de caudale mensuales en base a parámetros similares de la series de precipitaciones y unos pocos parámetro del modelo. Se muestran relaciones aplicadas para la estimación de promedios y varianzas e base a modelos del tipo Funciones de Transferencia entre precipitaciones totales y caudale para cuencas nivopluviales. Las relaciones para estimar los parámetros de estos modelos e base a las propiedades de las cuencas son preliminares y además tienen un carácter regional son válidas sólamente para cuencas de la zona central de Chile.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este artículo forman parte del proyecto de investigació FONDECYT 666/93.

BIBLIOGRAFIA

1) Box, G.E.P. and G.M. Jenkins. 1976. Time Series Analysis. Forecasting and Control Holden day, San Francisco.

2) Broockwell, P.J. and R.A. Davis. 1991. Time Series Theory and Methods. 2nd Editio Springer Verlag Series in Statistics.

3) Dirección General de Aguas. MOP, 1988. Balance Hídrico de Chile.

4) Fernández, B. 1991. Watershed Response to Meteorological Droughts. XXIV World Congress, Madrid, Spain, Sept.

5) Fernández, B. and G, Pizarro. 1994. Estimation of Monthly Runoff Properties using Transfer Function Models. Fourteenth Annual American Geophysical Union Hydrology Days. Colorado State University, Fort Collins, Colorado. April 5-8, pp 87-98.

6) Fernández, B. y G. Pizarro, 1995. Regresión dinámica entre caudales y precipitaciones mensuales en cuencas nivopluviales, XII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. INH. Nov. 8-10, Santiago, Chile.

7) Fiering, M.B. 1967. Use of correlation to improve estimates of mean and variance. Professional paper 434-C, U.S. Geological Service.

8) Lemke, K. 1991 Transfer Function Models of Suspended Sediment Concentration. Water Resources Research, 27-3:293-305.

9) Matalas, N.C. y Jacobs, B. 1964. A correlation procedure for aumenting hydrologic data. Professional paper 434-E, U.S. Geological Service.

10) Peña, D. 1987. Estadística. Modelos y Metodos. Vol. 2. Métodos Lineales y Series Temporales. Alianza Universidad Texto. Madrid, España.

11) Snorrason, A. Newbold, P. and W.H. Maxwell. 1984. Multiple Input Transfer Function Noise Modeling of River Flow. In W. Hall, C. Maxwell (ed.) Frontiers in Hydrology, Water Resources Publication, Littleton, Co.

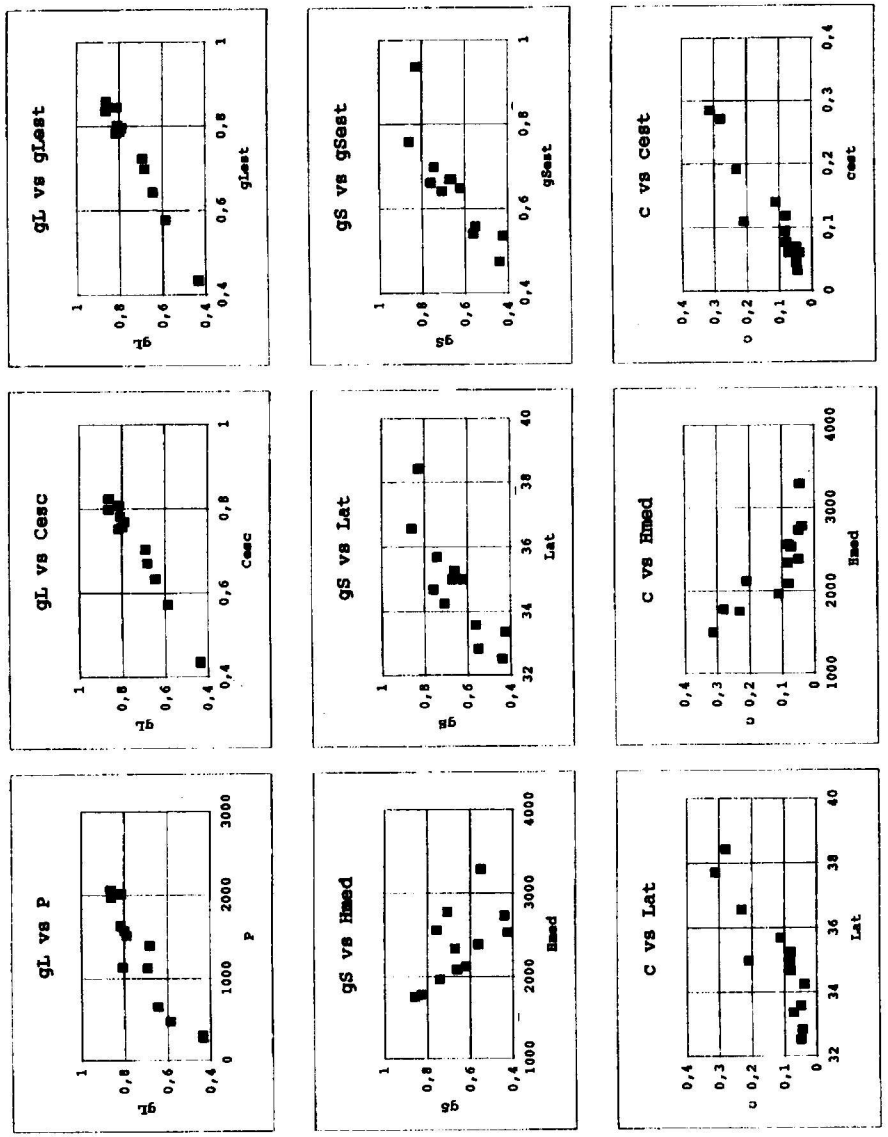

Figura 1: Relaciones gráficas entre algunos parámetros, sus variables explicativas y su estimador.

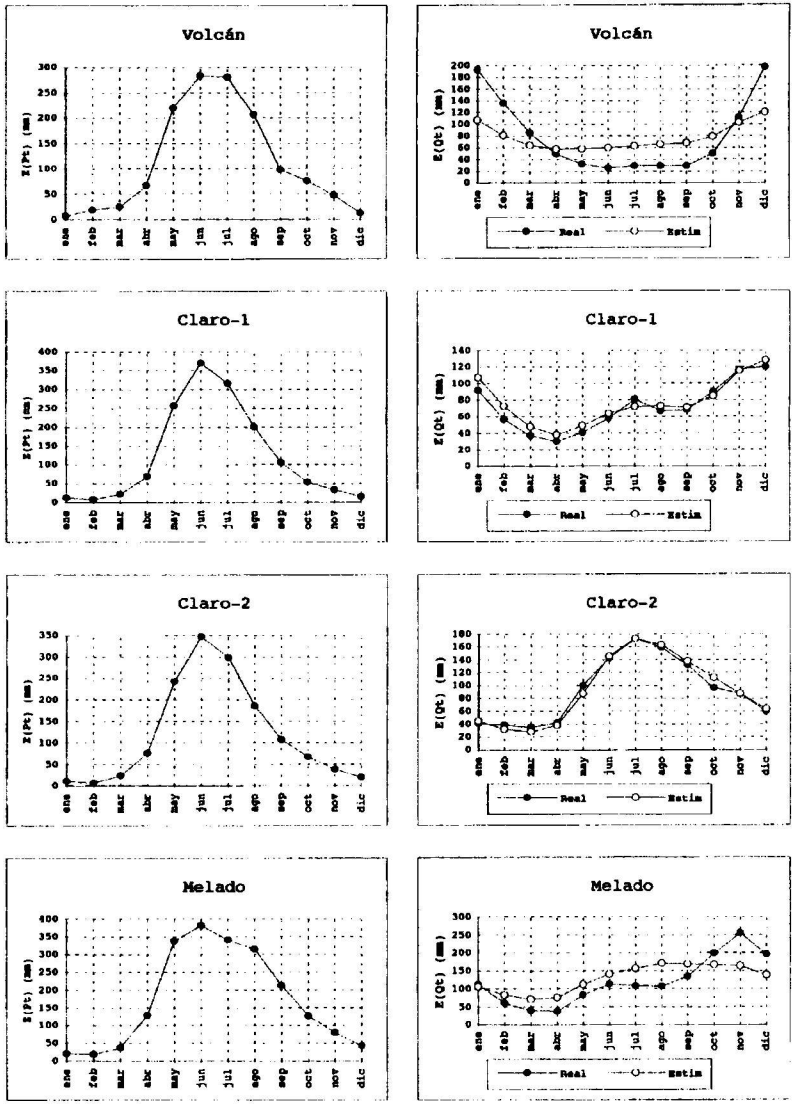

Figura 2: Precipitaciones medias mensuales y comparación entre los valores reales y estimados de cada cuenca.

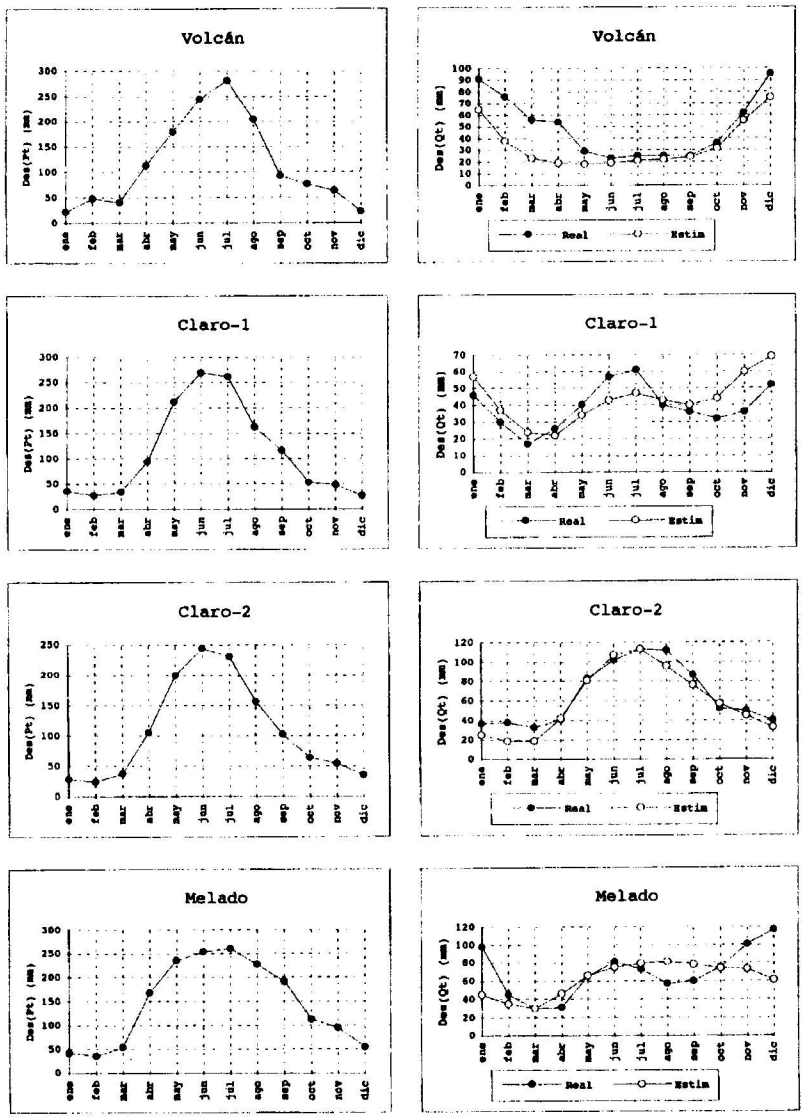

Figura 3: Desviación estándar de la precipitación y comparación entre los valores reales y estimados para las cuencas.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XII CONGRESO CHILENO

Sociedad Chilena
de Ingeniería Hidráulica

Instituto Nacional
de Hidráulica - Chile

4

UN MODELO MATEMATICO PARA LA PREDICCION DE CRECIDAS EN TIEMPO REAL: APLICACION AL RIO BIOBIO

ANDRES LOPEZ (1) - ANDREA NARDINI (2)
RENE RUIZ (3) - SERGIO QUIJADA (3)

RESUMEN

Se describe en este segundo artículo (de una serie de cuatro en esta edición) el desarrollo de un modelo matemático para la predicción de crecidas en el río Biobío, de acuerdo al planteamiento propuesto en el primer artículo.

Para esto, se han calibrado modelos de predicción ingreso-salida, del tipo ARMAX ampliados con paso horario y bihorario, usados en forma recursiva o directa. Se ha utilizado como variable de salida la altura limnigráfica en la estación Biobío en Desembocadura y como variables de entrada la altura limnigráfica en la estación Biobío en Rucalhue y la precipitación en la estación Quilaco.

(1) Ingeniero Civil M. Cs., Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

(2) Ingeniero Civil, Centro EULA-Chile y Dpto. de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción

(3) Ingeniero Civil